

国家森林资源清查遥感应用主要技术进展

丁相元, 陈尔学*, 李增元, 赵磊, 刘清旺, 徐昆鹏

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 国家林业和草原局林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091)

摘要:国家森林资源(连续)清查[national (continuous) forest inventory, NFI/NCFI, 文中统称NFI]是森林资源监测体系的重要组成部分, 可为制定国家林业发展战略和调整林业方针政策提供及时有效的科学依据。遥感在推动NFI技术进步方面发挥了重要作用, 已成为支撑NFI运行不可或缺的技术手段。在将遥感数据作为辅助数据用于提高NFI总体参数估测精度和效率方面, 国内外学者已开展了大量估计模型和方法研究, 可概括为4类: 设计推断法(design-based inference method)、模型辅助法(design-based and model-assisted method)、模型法(model-dependent method)和混合法(design and model hybrid method)。笔者针对这4类估测方法, 总结了国内外研究现状, 分析了国内相关研究存在的问题, 并就未来重点研发方向和内容提出了建议。在设计推断法方面, 国内外技术水平没有太大差距; 国外开展了大量模型辅助法研究并已应用于NFI业务, 但国内相关研究较少, 且业务应用仅体现在面积成数估计, 今后应加强该方法的应用示范和推广工作。关于模型法在NFI中的应用国外对多源数据协同应用中的不确定性度量方法进行了深入研究; 国内对模型法的研究也很多, 但对科学评价模型的拟合效果、度量模型估测结果的不确定性等缺乏系统研究, 应作为后续研究重点; 国外已针对NFI应用开发了3类混合法, 国内对第1类混合法研究较少, 对第2类混合法的研究还仅局限于用双重回归抽样法估计地类面积, 而对第3类混合法尚未采用“数据同化”思路开展相关应用研究。建议未来加强这3类混合法在国内NFI中的深入研究和应用示范。

关键词:国家森林资源清查; 遥感应用; 统计推断; 设计推断法; 模型辅助法; 模型法; 混合法

中图分类号: S757

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2023)01-0001-12



A review of remote sensing application in national forest inventory

DING Xiangyuan, CHEN Erxue*, LI Zengyuan, ZHAO Lei, LIU Qingwang, XU Kunpeng

(Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Resource Information Techniques, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: National (continuous) forest inventory (NFI/NCFI) is an important part of forest resources monitoring system, which can provide timely and effective scientific basis for formulating national forestry development strategies and adjusting forestry policies (follow-up called NFI). Remote sensing has played a vital role in promoting the progress of NFI technology. It has become an indispensable technical means to support the operation of NFI. In terms of using remote sensing data as auxiliary information in NFI to increase the accuracy and efficiency of population parameter estimation, scholars at home and abroad have carried out a large number of studies on estimation models and methods, which can be summarized into four categories: design-based inference method, design-based and model-assisted method, model-dependent method, design and model hybrid method. Focusing on these four categories of estimation models and methods, this research summarizes the current research status at home and abroad, analyzes the problems existing in domestic related research, and gives suggestions on the follow-up key research and development directions and contents, hoping to promote the comprehensive application of Space-Air-Earth multi-source observation data in China's NFI business. In terms of design-based inference method, there is little difference between domestic and foreign; a large

收稿日期 Received: 2022-09-05

修回日期 Accepted: 2022-11-06

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFE0117700)。

第一作者: 丁相元(dx4201@126.com), 博士生。*通信作者: 陈尔学(chenex@ifrit.ac.cn), 研究员。

引文格式: 丁相元, 陈尔学, 李增元, 等. 国家森林资源清查遥感应用主要技术进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 1-12. DING X Y, CHEN E X, LI Z Y, et al. A review of remote sensing application in national forest inventory[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(1): 1-12. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202209009.

number of design-based and model-assisted method research has been carried out abroad and has been applied to NFI business, but there are few domestic related research, business application is only embodied in area ratio estimation. Few research has been carried out on the estimation of quantitative forest parameters using the design-based and model-assisted method. The application, demonstration and promotion of this method should be strengthened in the future. The model-dependent method is the most basic method used by remote sensing in forest resources survey and monitoring. Lots of research has been done on the application of model method in NFI abroad, and the uncertainty measurement method in the collaborative application of multi-source data has been studied in depth. Also there are many domestic studies on model-dependent methods, but the systematic research on how to scientifically evaluate the fitting effect of the model and how to measure the uncertainty of the model estimation results are still need, which should be the focus of follow-up research. For the monitoring of forest resources in the area that difficult to investigate, the advantage of the model-dependent method, which is most conducive to solve the problem of small area estimation, should be fully utilized, and remote sensing as auxiliary data should be used to achieve effective estimation of forest parameters at different scales through the model-dependent method. Three types of design and model hybrid methods have been developed abroad for the application of NFI. There is little research on the first type of design and model hybrid method in China. The research on the second type of design and model hybrid method is limited to estimate land area by the double regression sampling method. Few research has been carried out on the design and model hybrid method of quantitative parameters such as stock volume; however, the research on the third type of design and model hybrid method has not yet adopted the idea of "data assimilation" to carry out relevant application research. It is recommended to strengthen the in-depth research and application demonstration of these three types of mixed methods in domestic NFI in the future.

Keywords: national forest inventory; remote sensing applications; statistical inference; design-based inference method; design-based and model-assisted method; model-dependent method; design and model hybrid method

国家森林资源(连续)清查[national (continuous) forest inventory, NFI/NCFI,文中统称NFI]和森林资源经理调查(forest management inventory, FMI)是世界上所有已建立森林资源监测体系国家的两大主要森林资源调查业务^[1-3]。在中国,NFI被称为国家森林资源清查或国家森林资源连续清查(一类调查),FMI则被称为森林资源规划设计调查(二类调查)^[4-5]。遥感在这两大业务中都已有广泛和深入的应用,但由于NFI是宏观尺度的调查(全国/省出数),而FMI是当地尺度的调查(每个小班出数),遥感在这两大业务中的应用方式、方法有较大的不同^[6-7],笔者主要聚焦遥感应用于NFI的技术研究进展。

NFI是国家森林资源监测体系的重要组成部分,可为制定国家林业发展战略和调整林业方针政策提供及时有效的科学依据。遥感在推动NFI技术进步方面发挥了重要作用,已成为支撑NFI业务运行不可或缺的技术手段。遥感之所以在NFI中显得越来越重要,主要是在3个方面受到了NFI业务刚性需求的驱动:①小面积估计需求。保持现有的NFI地面样地数不变,但希望能得到省以下行政区域或经营管理单元(市、县、林场等)总体参数(总量或变化等)的有效估计,也就是要求监测的空间“粒度”更细。②年度监测需求。在现有NFI

基础上做到年度监测,即要求监测的频率更高。③实现前两个需求的同时做到低成本和高精度。在以上需求约束下,依靠对单元标志值敏感的辅助信息是必然的技术途径,而遥感数据是最常用和最具有潜力的辅助数据之一^[8]。笔者总结了目前NFI估测方法的国内外研究现状,分析了国内相关研究存在的问题,并给出了后续重点研发方向及内容建议,以期对天空地多源观测数据在我国NFI业务中的深入应用起到一定的促进作用。

1 NFI遥感应用主要技术方法

针对NFI应用需求而开展的抽样调查、统计推断相关理论和方法研究,也明显体现了科研人员在将遥感纳入NFI技术体系方面所做的各种努力。目前,在NFI业务需求推动下研发的各种总体参数统计推断方法可概括为4类^[9]:①基于设计的推断方法(design-based inference method),简称设计推断法;②基于设计和模型辅助的方法(design-based and model-assisted method),简称模型辅助法;③基于模型的方法(model-dependent method),简称模型法;④设计和模型混合推断法(design and model hybrid method),简称混合法。这4类总体参数估计方法的特点对比见表1。

表 1 4 类 NFI 总体参数估计方法特点的比较
Table 1 The comparison of the four NFI total parameter estimation methods

方法 method	描述 description	优点 advantage	缺点 disadvantage
设计推断法 design-based inference method	收集的数据为概率样本数据;认为总体是固定值;不确定性来源于抽样	原理简单;无偏估计;置信区间可靠	部分情况下,概率样本可能无法实现,成本高昂
模型辅助法 design-based and model-assisted method	在概率样本数据的支撑下,利用低成本的辅助数据和模型建模,并对结果进行校正,提高估计精度;不确定性来源于抽样和模型	当辅助数据与目标参数之间强相关时,会提高估测效率(给定精度水平条件下,所需样地数量更少)	需要概率样本;估计量的表达形式可能非常复杂;样本量足够时为无偏估计;小样本的置信区间不可靠
模型法 model-dependent method	完全利用辅助数据和模型建模实现目标参数估计;不确定性来自各个总体单元观察值的随机性以及模型	无须概率抽样假设;成本较低	有偏估计;模型估计量对结果影响较大
混合法 design and model hybrid method	基于设计和模型的混合;不确定性来源于抽样和模型	结合了设计的无偏估计和模型的优势;可节约成本	辅助数据需满足概率抽样假设;有偏估计;模型估计量对结果影响较大

1)设计推断法。设计推断法是依赖概率抽样样本的调查方法。本研究中设计推断法是指只基于概率抽样样本进行统计推断的方法,也可以采用辅助变量进行估测但不应涉及回归估计模型的应用。简单随机抽样、系统抽样、分层抽样、整群抽样、成数抽样以及多阶抽样等都可用于设计推断法^[10]。适合以遥感特征作为辅助变量的设计推断法主要包括分层抽样、成数抽样等。

该类方法通常是假设总体由 N 个单元组成,通过对单元的抽样调查估计总体某个标志的值,可以是某个标志的总量,也可以是平均值、两个标志的比值等^[11]。为了估计固定但未知的参数,根据适当的抽样设计,按一定概率从总体中抽取一套样本,每个单元具有大于零的包含概率,然后采用数学公式(估计量),根据样本数据估计目标参数。由于样本的抽取具有随机性,因此估计量根据样本单元所估测的总体参数值也是一个随机变量^[9]。大范围的森林资源调查目的是获取总体参数的合计值或均值,通常情况下会基于设计的抽样框架进行估算,利用抽样获得的样本来估计总体值,在该框架下,估计方法是设计无偏的。由于该方法理论体系成熟,且设计无偏,因此被广泛使用。然而,该方法对样本概率性条件要求苛刻,在小样本量下,估计的精度有限^[12]。

2)模型辅助法。模型辅助法通过使用模型和辅助数据来提高估计精度,是一种介于设计推断法和模型法之间的方法^[12]。该方法的总体估计和方差估算形式与传统设计推断法以及模型法有较大区别,可用的模型形式包括线性、非线性回归以及

非参数方法等^[13]。

该类方法的基础假设与设计推断法相同,在获取概率抽样样本基础上,建立辅助数据(自变量)和样本观测值(因变量)之间的关系模型,基于该模型得到每个实测样本的估测值,利用样本估测值与实测值之间的偏差,校正基于模型计算得到的总体参数估测值。该方法继承了设计推断法的所有优点,同时又利用了辅助数据和模型,通常可提高总体参数的估测精度^[14-16]。模型辅助法可利用的辅助数据包括遥感、地形、土壤、气象等数据,其中利用最多的还是遥感数据^[9]。

3)模型法。该类方法也是在抽样调查背景下产生的^[17-19],然后被应用于森林资源清查中^[20-23]。模型法理论上是有偏的,因此模型估测结果不确定性的估计方法是国际上模型法研究的热点。

模型法中的假设与设计推断法、模型辅助法有很大不同。首先,模型法假设对总体单元的观察是一个随机变量,而不是像设计推断法和模型辅助法那样假设每个单元的观测值是一个固定常数。其次,模型法的基础是“模型”,其随机性是通过总体单元取值分布的随机性实现的,而设计推断法和模型辅助法的随机化是通过总体单元被随机选择样本而实现的^[24]。

相对于设计推断法和模型辅助法,模型法具有 2 个优势。首先,模型法不依赖于概率抽样样本,因此可适用于采用更多种抽样方案所获得的地面观测数据。其次,模型法可以使用感兴趣区域之外的数据,因此,它可以用于样本大小可能不足以进

行设计推断的小区域,或者无法到达并获得采样数据的区域^[25]。模型法的缺点为估计结果有偏^[26]。然而,在地面实测样本量很小的情况下,模型法的估测精度一般会更高^[12]。

4)混合法。混合法是一种将设计推断法和模型法混合应用的方法,最初由 Ståhl 等^[27]提出,后来被 Corona 等^[28]称为混合法。该方法充分发挥了模型法和统计推断法的优势,也可以认为是一种特殊的模型法^[9]。混合法遵循设计推断和模型法的基本假设,一种典型应用场景就是当模型法所用的遥感辅助数据不是对总体全覆盖,而是采用概率抽样方式获取。这时仍然需要建立一个估测模型,这和模型法完全一致,但总体参数估计方差的计算需要考虑遥感辅助数据以概率抽样获取时所引起的不确定性。

2 NFI 遥感应用主要技术方法发展现状

2.1 设计推断法的提出和应用

19 世纪初,国外森林资源调查的主要方法为详查,后来,在抽样技术的支持下,开始选取具有代表性样本进行调查,并逐渐发展为现在的设计推断法^[29]。该方法的基础理论最初由 Neyman^[30]提出,给出了样本估计的置信区间,奠定了随机抽样和分层抽样的应用基础。设计推断法是最常用的森林资源抽样调查方法,也是 NFI 的基本方法,但完全基于实地样地调查成本很高,且难于对不可到达区域进行监测,而遥感手段的引入,大大提高了传统 NFI 的监测效率和精度^[31]。对于设计推断法,遥感数据可辅助抽样设计规划、样地地类识别和参数估计,以及作为分层依据等^[32]。如在利用双重分层抽样进行总体森林参数估计时,可通过目视判读与解译,估计不同地类的权重与分配比例,提高总体参数的估测精度与效率^[33-34];北美地区在 20 世纪初便采用该方法对地类进行分类识别,然后利用分层抽样技术实现森林资源参数的估算^[35];其他发达地区如欧洲等也利用了该方法以提高监测效率与精度^[36-38]。该方法早期以航空遥感数据为主,随着卫星技术的发展,Landsat 系列卫星、SPOT 系列卫星、Quickbird 系列卫星以及哨兵系列卫星等遥感数据也被广泛应用于 NFI 监测中^[39-42]。目前,设计推断的方法理论已较成熟,在各个国家 NFI 中得到了广泛应用^[31,38]。

抽样技术也是国内 NFI 监测的基础。国内自 20 世纪 60 年代开始引进抽样技术^[43],并进行了大量的研究^[44-45]。在一类调查中进行遥感技术的应

用研究始于 20 世纪 70 年代,主要以应用试点的形式进行;90 年代末,第六次全国森林资源清查后开始全面应用^[4,46]。

针对以遥感数据为辅助的设计推断法,李芝喜等^[47]将陆地卫星数据、航片数据、地形图以及角规样地数据相结合,利用多阶不等概率抽样(PPS)进行了总体森林蓄积量的估测研究,其中,一阶单元面积成数和二阶单元蓄积,均采用人工解译和判读,三阶单元采用角规测量,研究认为该方法可大大提高监测效率;欧润贵^[48]介绍了 Landsat ETM+ 卫星遥感数据在 NFI 中的应用,包括利用卫星数据对面积的成数抽样,以及双重抽样方法,均属于设计推断法。

曾伟生^[49]介绍了用遥感判读代替地面调查的应用方式,尤其是沙漠、戈壁以及草原地区,遥感判读正确率较高,可将遥感判读样地视同地面调查样地对待,对于一些不可及区域,也可以将遥感判读结果近似作为地面调查结果参与抽样估计。新疆、西藏、青海等省(区)的一类调查中遥感技术的应用便采取(或部分采取)了这种方式。林辉等^[50]基于 Landsat TM 和 ETM+数据,对湖南省森林总面积进行了实验研究,通过对遥感样地进行目视解译,进而估算全省各地类森林总面积,加权精度达到 85.31%,一级地类正判率超过 90%,二级地类正判率在 70%以上;郑冬梅等^[51]以全国森林资源宏观监测 9 个省的遥感判读结果为依据,对比分析了群团样地判读和图斑区划判读的森林覆盖率、森林面积、正判率、抽样精度和差异原因,结果表明群团样地判读的结果效率更高。

近年来,为了实现年度监测目标,国内学者研究了遥感大样地与地面调查数据结合的年度出数方法,部分研究便应用了基于遥感的设计推断法,如程志楚等^[52]研究了遥感大样地用于森林资源清查面积出数的可行性,分析了遥感大样地的大小对面积估测精度的影响,遥感大样地的解译判读和地面调查融合在一起,将解译结果作为真值,采用系统抽样方法计算总体平均数和方差;王雪军等^[53]探讨了全国森林面积和森林蓄积年度出数方法,在现有 NFI 抽样框架基础上,每年按 20 km×20 km 网格系统抽取 1/17 的样地开展固定样地调查,遥感解译样地仍保持不变,采用固定样地和遥感解译样地按成数抽样估计全国各地类面积,只用固定样地的方式采用分层抽样估测全国蓄积量,分层依据为全国林地“一张图”。

2.2 模型辅助法的核心思想和应用

模型辅助法的核心思想是修正与校准,20世纪末该思想便被应用于实验研究,之后便被广泛应用于 NFI 研究中^[54]。Breidt 等^[55]在森林健康调查相关的模拟研究中使用样条模型估计总体参数,结果显示,利用多种辅助变量的两阶段模型辅助估计方法表现较好。Opsomer 等^[56]在两阶系统抽样设计中使用了模型辅助估计,应用广义可加模型将地面测量数据与遥感的辅助信息进行关联。Boudreau 等^[57]以 GLAS 卫星数据与土地利用数据为数据源,结合模型辅助法估计了加拿大魁北克的生物量,表明 GLAS 波形激光雷达数据可以改善大区域森林地上生物量的监测精度。Andersen 等^[58]基于模型辅助法,利用样地数据和条带抽样的 LiDAR 数据估算了阿拉斯加西部基奈市的生物量,证明了模型辅助法在区域生物量监测中的优势。

Næsset 等^[59]利用 LiDAR 数据和干涉合成孔径雷达数据估计了挪威奥尔斯科格生物量,并基于模型辅助的方法,比较评价了这两种类型辅助数据的估计精度。Gregoire 等^[60]采用两阶段的模型辅助法对森林生物量进行了估计,第1阶段为条带抽样的机载 LiDAR 数据(ALS)或条带更窄的机载 LiDAR 数据(PALS),第2阶段为系统分布的国家森林资源清查固定样地,基于两种 LiDAR 数据估算的生物量结果类似。Ene 等^[61]和 Gregoire 等^[62]也针对这种设计方法进行了更加深入的研究。

Stephens 等^[63]在基于设计的框架中应用了双重抽样回归估计量,使用机载 LiDAR 数据作为辅助信息估计新西兰森林中的碳储量。Strunk 等^[64]从不同的角度对模型辅助法进行了研究,发现利用模型辅助法估计森林面积、蓄积和生物量等参数时,激光脉冲的密度对估计精度几乎没有影响。Nelson 等^[65]和 Gobakken 等^[66]以 LiDAR 为数据源,对挪威海德马克县地上生物量进行了估算,并比较了模型辅助法与模型法,发现两种方法结果类似。Næsset 等^[67]进一步评估了 Gobakken 等^[66]开发的两阶段模型辅助法的精度,着重分析了方差估计对不相等的样本条带长度和系统选择条带的敏感性。

Massey 等^[68]在瑞士国家森林清查中开展了模型辅助估计技术的适用性研究,讨论了多种非参数方法在模型辅助估计中的优势和不足,分析了差分估计和回归估计之间的密切联系。Saarela 等^[15]提出在两相模型辅助采样研究中,对激光扫描条带数据进行概率比率采样,并利用该方法估计了芬兰库

奥坦北部森林地区的总蓄积量;研究还发现,全覆盖的陆地卫星辅助信息与仅使用采样激光雷达条带数据相比,估计量的精度有所改善。Chirici 等^[69]以意大利中部的莫利斯地区为研究区域,利用模型辅助估计量,比较了回波参数和高度变量用于估算地上总生物量的性能,结果显示两者都可以获得很高的精度,且辅助数据的应用可提高估计精度。McConville 等^[13]对模型辅助法的应用以及公式等进行了详细的介绍,可为后续研究提供参考。

由于 NFI 属于宏观尺度的森林资源监测,通常采用卫星遥感特征为辅助数据,但目前能获取到的卫星遥感影像还都对森林平均高、蓄积量等参数不够敏感,我国 NFI 在总体蓄积量估计上还很少采用遥感数据。因此国内还没有针对估计平均高、蓄积量等森林定量参数的模型辅助法应用研究,但遥感作为辅助因子用于地类面积或成数估计已较为普遍。

唐守正^[70]提出了两相抽样的估测方法,通过抽取遥感样地和地面样地建立两相抽样样地,通过转移矩阵调整面积和蓄积估计值,对于部分合并类别项的蓄积,采用最小平方相对误差进行调整,方法中虽然并未涉及遥感辅助数据与实测数据结合建模的问题,但采用了修正的思想。宋新民等^[71]介绍了“用相片判读地面修正成数抽样”方法,在国内后续基于遥感解译样地的 NFI 技术研究中常被称为“双重二阶抽样”。葛宏立等^[72]在二相估计中采用了该二相估测方法,并改进了方差、协方差的计算方法。该研究利用了系统抽样遥感解译样地(一相样本)、前期地面样地数据(二相样本)、年度监测年完成的地面样地数据(三相样本),进行了森林资源面积三相抽样年度监测方法研究。先用一、二相样本进行前期面积的二相抽样估计,再将结果用于二、三相样本的二相估计,这两步估测都采用了地类转移矩阵分别对一、二相样本的总体参数估计值进行了校正。张宗秀等^[73]以 2007 年四川省森林资源连续清查数据为案例,利用遥感解译样地和固定样地数据,开展了双重二阶抽样森林资源面积抽样估计精度研究,该方法能够明显提高各类土地面积的成数估计精度,其中也利用了对遥感数据判读结果校正的思想。

2.3 模型法的参数特点和应用

将遥感特征作为辅助数据,基于模型法估测大范围、全覆盖的森林资源参数研究已有很多^[74-80]。只要采用若干样地和遥感特征建立了正确的估测模型,就可以得到像元尺度的估测结果,因此模型

法是遥感应用于森林资源调查监测的最基本方法^[81-82],特别是对于从事遥感应应用技术研究的学者,研发高精度的生物物理参数遥感估测模型是他们的主要科研任务。

模型法的结果精度受模型形式、变量等因素影响较大^[26],对其不确定性的度量是 NFI 应用研究中的重要方向。对于模型法的不确定性主要利用 RMSE、方差、模型效率以及 AIC 等指标衡量^[83],NFI 监测中多用 MSE 或方差^[8,84-85]。

20 世纪末,模型法被逐渐应用于 NFI 中^[86],之后研究人员针对模型形式和不确定性进行了大量研究^[87-88]。McRoberts^[12]分析了 GPS 位置误差对模型辅助法、模型法推算森林面积比例的影响。Saarela 等^[15]评估了芬兰库尔坦研究区模型形式和样本量对模型法估计精度的影响,不同模型形式的结果存在一定的差异。Saarela 等^[8]评估了遥感数据和实地测量之间的地理不匹配对模型法、模型辅助法的影响。McRoberts^[12,89]将陆地卫星数据作为辅助信息和野外样地数据相结合,应用模型法估算了美国明尼苏达州北部总体森林面积,并对方差的估计进行了优化。Chen 等^[90-91]考虑异速生长模型、单木测量、单木地上生物量(AGB)预测、样地 AGB 估算以及遥感像元尺度的 AGB 估算全过程的误差,揭示了利用野外样地校准遥感生物量模型时,考虑地块 AGB 估计不确定性的重要性。

LiDAR 数据相对多光谱、高光谱以及 SAR 等数据,对森林高度、胸径以及蓄积量等森林参数的估计精度更高^[92-94]。LiDAR 技术的快速发展,大大推动了模型法在 NFI 中的应用,尤其是 GLAS (ICESat)、ATLAS (ICESat-2)以及 GEDI (ISS) 星载激光雷达数据的广泛使用,为大范围的 NFI 监测提供了数据支撑^[95-98]。

Saarela 等^[99]提出了基于空天地 3 种数据源的分层模型推理法(hierarchical model-based inference, HMB),可提高总体参数的估计精度,但该研究基于模拟数据,且仅仅适用于线性模型。针对这种分层的模型法, Saarela 团队对无人机数据的抽样方式、模型方法以及不同卫星数据的潜力进行了实际应用和优化^[85,100-101]。为了使该方法适用于非线性模型, Saarela 等^[102]对模型残差以及方差的估算进行了优化,并考虑单木异速生长模型的误差传递影响,提出了通用的分层模型推理法(GHMB)。

在非参数模型方法总体不确定性估计研究方面, Esteban 等^[103]利用随机森林方法,采用自助法

(bootstrapping)估算了西班牙和挪威两个试验区的总体蓄积量不确定性。Sandoval 等^[104]基于激光雷达数据,提出利用自举引导对(bootstrapping-pairs)方法检验总体估计的不确定性,估算了亮果桉(*Eucalyptus nitens*)和蓝桉(*Eucalyptus globulus*)林分的平均蓄积和方差,对比了传统自举引导对、考虑同方差残差和异方差残差 3 种情况,结果显示,对于面积较大的总体结果不确定性较小,当面积较小时,需考虑异方差残差。

总之,国外已经对空天地多源数据协同应用中的不确定性进行了广泛的研究,包括参数和非参数方法的不确定性量化分析、单木模型-样地-像元尺度-总体的误差影响分析等,为森林资源监测提供了重要的技术支撑。

利用对总体全覆盖的遥感影像,结合若干地面调查样地观测数据,估测每个像元的地类或定量参数,这是最典型的遥感应应用情景,国内在相关分类、估测模型方法方面的研究非常多,具体可参考李增元等^[105]、庞勇等^[106]、黄华国^[107]、张王菲等^[108]的总结。总体来看,国内森林遥感监测应用技术研究学者所研发的森林参数遥感定量反演、估测方法,基本上都属于模型法。而针对 NFI 业务的以遥感为辅助变量的模型法研究却很少。

张煜星等^[109]研究了森林面积和空间分布的“多阶遥感监测”技术,为建立全国森林资源年度监测技术框架提供技术支持。将中空间分辨率遥感(中分遥感)地类判读样地数据、高分遥感地类判读样地数据和地面验证地类数据,共 3 级数据采用了级联的回归估计模型对省级总体森林面积进行估计。虽然中分遥感样地的布设采用系统抽样,但总体参数方差的计算只考虑了回归模型引起的不确定性,并没有考虑遥感系统抽样会导致的抽样误差。该研究还将中分遥感样地判读结果用于确定低分遥感森林-非森林分类的 NDVI 阈值,这相当于用一个简单的模型实现低分遥感每个像元的森林分类,主要用于森林分布图的制作,这一步也属于模型法。

在以遥感为辅助变量的模型法不确定性估计方法研究方面, GHMB 方法用于样地-抽样激光雷达-卫星遥感协同估测像元森林参数,第 2 步估测模型以第 1 步基于抽样获取的 LiDAR 数据估测的森林参数作为因变量,不同像元之间的因变量取值不可避免具有空间相关性^[102],因此 Zhao 等^[110]在第 2 步建模时将 GHMB 的非空间模型改为回归克里格(RK)模型,提出了基于地统计学方法的森林

参数估测及其不确定性估计方法 RK-GHMB。该方法虽然以林场为实验区进行验证,但所提出的方法也同样可用于 NFI。

2.4 混合法与其他方法的区别及应用

国外已根据具体的 NFI 应用需求,开展了多种混合法研究,可概括为 3 类。

1) 设计推断法所基于的样地数据采用单木生长模型估计得到。在只基于抽样样地对总体参数进行估测时,若假设样地蓄积量等参数是真值,这种估计方法就是纯粹的设计推断法;但若样地蓄积量等参数是由样地上单木参数求和得到的,而单木参数的计算采用了生长方程(模型法),则此估计方法就成了混合法。McRoberts 等^[25]利用混合法评估了单木蓄积量模型预测中的不确定性对大范围区域蓄积量估计的影响。样地蓄积量的估计利用了单木生长方程,自然会产生模型估测误差,进而基于单木生长模型估测的样地蓄积量,采用设计推断法进行总体蓄积量的估测。这里所用的数据只是按概率抽取的每个样地的单木测量数据,并没有用到遥感及其他辅助数据。

2) 模型法所用遥感辅助数据采用概率抽样获取。在森林资源调查过程中,有时获取大范围全覆盖的遥感辅助数据(如 LiDAR 数据)的成本可能非常高昂,这时可采用抽样的方式获取遥感辅助数据,形成对整个研究区域按一定概率抽取的遥感观测样本,以降低成本。随着对如何获取区域或国家可靠、稳定和可重复估测的森林资源监测数据的需求不断增加^[111],将遥感数据和样地数据相结合的多相和多阶抽样方法研究越来越多。如两相抽样,在第 1 阶段,基于概率设计,获取部分条带分布的激光雷达数据,然后根据概率原理在激光雷达数据条带内获取样本数据,此时样本数据的位置同时包含实测数据和激光雷达数据。第 2 阶段主要利用样地数据和激光雷达数据相关变量建立模型,并将该模型应用于整个激光雷达条带数据估算目标参数,进而估算总体参数和方差。该方法提高了设计的复杂性,也提高了估计精度,为了实现对不确定性的量化,该方法中遥感辅助数据的抽取也必须遵循严格的概率抽样框架^[9,62,112]。

假设由森林样地调查数据计算得到的森林参数值为真值,作为因变量,以遥感特征为自变量,采用模型法进行估测。这时,若遥感对调查区域是全覆盖的,这种模型法就是“纯”基于模型的方法;若采用抽样方式对调查区域进行遥感观测(非全覆盖),则就属于混合法。如 Ståhl 等^[27]采用该框架

进行总体森林资源参数的估测,其中不确定性通过第 1 阶段的抽样方差[由抽样获取的机载激光雷达(ALS)数据各条带预测值之间的不一致性引起]和由模型引起的不确定性两个加性成分进行量化。部分学者在同一区域,基于条带抽样 LiDAR 数据以及样地数据,使用混合推断估计森林资源参数^[66-67,113]。Healey 等^[114]利用 GLAS 数据在加州进行了混合推理模型的应用试验。Margolis 等^[115]也利用抽样的 GLAS 数据和航空 ALS 数据,估算了北美北方森林地上生物量。

3) 模型辅助法所采用的样地数据通过时间维预测模型得到。假设遥感对感兴趣区域的成像观测时间就是目的调查时间,并且遥感观测可对感兴趣区域全覆盖,拟采用模型辅助法进行估测。若样地和遥感观测是同一个时间完成的,这属于纯粹的模型辅助法;但若在遥感观测时并没有开展样地观测,或只采集了部分样地数据,需要借用历史样地数据,这就需要用生长方程将历史样地的蓄积量等参数推算到目标调查时间点,这个推算方法属于模型法。以上结合起来就是一种典型的混合法,显然这种方法是实现年度监测的一种重要方法。如 Condés 等^[116]利用混合法,对西班牙国家森林资源清查数据进行了年度更新。首先利用第 2 次和第 3 次国家森林资源清查数据,采用生长模型将样地数据调整到第 4 次清查时间点,这属于模型法;然后将经调整得到的样地数据与第 4 次清查时间点的样地数据合在一起,并以 Landsat 数据为辅助变量,对第 4 次清查时间点森林资源总体参数采用模型辅助法进行预测;整个估测过程既采用了模型法,又采用了模型辅助法,也属于一种混合估测法。

尚未查阅到以遥感为辅助变量,针对 NFI 应用的估测总体森林平均高、蓄积量等定量参数的混合法研究文献。但在地类面积或成数估计方面,国内常用的是双重回归抽样法。如鲁赛尼·阿特马维扎扎等^[117]对双重回归估计法进行了试验,遥感数据采用的是航片。宋新民等^[71]介绍了双重回归抽样法,在方差估计上既考虑了回归估测模型误差,又考虑了抽样误差,可归为混合法。国内后续开展的应用研究多引用了该方法,如陈振雄等^[118]基于遥感大样地双重抽样方法,采用系统抽样等间距设置一定数量的遥感解译大样地和地面样地,以遥感样地为一重样本,用于区划判读,地面样地为二重样本,结合遥感样地判读结果,采用双重回归对广东省主要地类面积进行了估计。另外,曾伟生等^[119]提出了利用联合估计以及双重回归估计两

种方法实现 NFI 年度出数,虽然文中未提及遥感数据,但该思路也可归于混合法。

3 我国 NFI 遥感应应用技术研究展望

森林资源监测是资源管理的基础性工作,结合天空地一体化遥感观测数据,有助于多尺度、全方位获取森林资源信息,在资源变化监测、智慧分析与决策方面,为林业全周期适应性经营、优化经营、多目标经营提供支持^[120]。4类 NFI 估测方法在我国应用前景广阔。

1)设计推断法。该方法是 NFI 的基础方法,以地面调查样地数据为主进行推断,遥感能介入的主要是辅助分层抽样设计,如用遥感制作的地类分布图作为分层依据;并通过布设遥感解译样地,将遥感解译样地和地面调查样地一起用于成数抽样。这类方法的国内外技术水平相差不大。

2)模型辅助法。国外对模型辅助法有很多的研究,已经在 NFI 业务中应用,但国内很少开展相关研究,实际应用较少。目前可归入模型辅助法的研究,如以遥感为辅助数据的二相成数抽样方法,也只是用于地类面积或成数的估计,鲜见有关采用模型辅助法估计森林定量参数的研究报道。以 NFI 样地数据为基本数据,实现小面积估计(实现市/县等子总体出数)是驱动国外模型辅助法研究和应用的重要原因。中国对实现国家-省-县3级森林资源一体化监测也有很强的需求,模型辅助法是一种很好的小面积估计方法,是实现一体化监测的有效方法,建议今后加强该方法的应用示范和推广工作。

3)模型法。国内林业遥感应应用科研人员对模型法的研究很多,但鲜见对其不确定性度量的深入探讨,更缺乏对层次化联合估测模型的研究。目前我国 NFI 业务采用模型法的可能性不大,主要是模型法的统计推断理论还不够完善,国外虽有一些新的进展,但还不够成熟。另外目前还缺乏对蓄积等定量参数较敏感的可大区域获取的遥感数据,如可对全国、省、市等全覆盖的机载 LiDAR 数据、P 波段 SAR 数据等。但在基于 NFI 数据的增值应用上应大胆尝试,比如对于调查困难地区森林资源的监测,应充分发挥模型法最有利于解决小面积估计问题的优势,以遥感为辅助数据通过模型法,实现不同尺度森林参数的有效估计。后续研究重点包括外业样地调查方法、模型拟合效果评价方法、多尺度估测结果不确定性估计方法等。

4)混合法。国外已发展了3类混合法。第1

类是在基于 NFI 样地进行设计推断时,将样地的蓄积量、地类等因子看成是通过单木异速生长模型估计得到的,存在模型估计误差。国内 NFI 技术研究很少考虑这类误差对总体参数估计不确定性的影响,需要加强这方面相关研究。第2类混合法的特点是少量样地调查数据和按概率抽取的遥感数据的综合应用;样地可以主观选择,也可以是按概率抽样,但遥感数据必须是按概率抽取^[27]。国内 NFI 的样地早已将遥感解译样地纳入,在 NFI 框架下为实现年度监测而大量试验的森林资源宏观监测方法主要采用了遥感大样地系统抽样数据^[118],适合采用混合法。但国内这方面的研究仅限于用双重回归抽样法估计地类面积,还没有对蓄积量等定量参数的混合估测法开展研究。同时,国内采用双重回归抽样法估计地类面积的研究,所建立的回归模型都是将遥感样地解译的地类面积或成数作为自变量,而不是将遥感特征作为自变量。直接通过遥感模型估测得到抽样的遥感区域所有像元的目标参数,如地类、蓄积量,然后再由遥感估测的象元尺度地类、蓄积量,通过设计推断法得到总体参数,这在国内未进行试验研究,有必要深入开展相关研究工作。特别是今后国家林业和草原局陆地生态系统碳监测卫星的应用,该卫星搭载的波形激光雷达将抽样式获取波形 LiDAR 数据,尤其适合这种混合法。第3类混合法适合用于实现年度监测。国内主要采用了回归估测的方法将“历史”样地推算到“当前”用于设计推断,可以全部用推算得到样地数据,也可以综合利用推算样地数据和实际调查样地数据^[119,121]。这也是国外常用的年度监测方法。国外目前的研究热点是发展可更加充分利用时间序列遥感数据的、适用于 NFI 框架森林资源年度监测的“数据同化方法”,建议国内也尽快启动相关试验示范研究。

参考文献(reference):

- [1] NASSET E. Area-based inventory in Norway—from innovation to an operational reality [C]. // Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013: 215–240. DOI: 10.1007/978-94-017-8663-8_11.
- [2] BREIDENBACH J, MCROBERTS R E, ASTRUP R. Empirical coverage of model-based variance estimators for remote sensing assisted estimation of stand-level timber volume [J]. Remote Sens Environ, 2016, 173: 274–281. DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.026.
- [3] RAHLF J, HAUGLIN M, ASTRUP R, et al. Timber volume estimation based on airborne laser scanning: comparing the use of national forest inventory and forest management inventory data [J]. Ann For Sci, 2021, 78(2): 1–14. DOI: 10.1007/s13595-021-01061-4.
- [4] 肖兴威. 中国森林资源清查 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.

- XIAO X W. National forest inventory of China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005.
- [5] ZENG W S, TOMPPA E, HEALEY S P, et al. The national forest inventory in China: history-results-international context[J]. *For Ecosyst*, 2015, 2(1): 23. DOI: 10.1186/s40663-015-0047-2.
- [6] 唐小平, 翁国庆, 陈雪峰, 等. 森林资源规划设计调查技术规程: GB/T 26424—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [7] 张煜星, 闫宏伟, 黄国胜, 等. 森林资源连续清查技术规程: GB/T 38590—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [8] SAARELA S, SCHNELL S, TUOMINEN S, et al. Effects of positional errors in model-assisted and model-based estimation of growing stock volume[J]. *Remote Sens Environ*, 2016, 172: 101–108. DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.002.
- [9] STÅHL G, SAARELA S, SCHNELL S, et al. Use of models in large-area forest surveys: comparing model-assisted, model-based and hybrid estimation[J]. *For Ecosyst*, 2016, 3: 5. DOI: 10.1186/s40663-016-0064-9.
- [10] KERSHAW J A, DUCEY M J, BEERS T W, et al. Sampling designs in forest inventories[C]// KERSHAW J A, DUCEY M J, BEERS T W, et al. *Forest Mensuration*. Hoboken: Wiley Online Library, 2016: 305–360. DOI: 10.1002/9781118902028.ch10.
- [11] GREGOIRE T G, VALENTINE H T. Sampling strategies for natural resources and the environment[M]. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2007. DOI: 10.1201/9780203498880.
- [12] MCROBERTS R E. Probability- and model-based approaches to inference for proportion forest using satellite imagery as ancillary data[J]. *Remote Sens Environ*, 2010, 114(5): 1017–1025. DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.013.
- [13] MCCONVILLE K S, MOISEN G G, FRESCINO T S. A tutorial on model-assisted estimation with application to forest inventory[J]. *Forests*, 2020, 11(2): 244. DOI: 10.3390/f11020244.
- [14] ENE L T, NASSET E, GOBAKKEN T, et al. Assessing the accuracy of regional LiDAR-based biomass estimation using a simulation approach[J]. *Remote Sens Environ*, 2012, 123: 579–592. DOI: 10.1016/j.rse.2012.04.017.
- [15] SAARELA S, GRAFSTRÖM A, STÅHL G, et al. Model-assisted estimation of growing stock volume using different combinations of LiDAR and Landsat data as auxiliary information[J]. *Remote Sens Environ*, 2015, 158: 431–440. DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.020.
- [16] BREIDT F J, OPSOMER J D. Model-assisted survey estimation with modern prediction techniques[J]. *Statist Sci*, 2017, 32(2): 190–205. DOI: 10.1214/16-sts589.
- [17] MÄTERN B. Spatial variation[M]. New York: Springer Verlag, 1986. DOI: 10.1007/978-1-4615-7892-5.
- [18] 李陶, 李明阳, 钱春花. 结合冠层密度的森林净初级生产力遥感估测[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(5): 153–160. LI T, LI M Y, QIAN C H. Combining crown density to estimate forest net primary productivity by using remote sensing data[J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 45(5): 153–160. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202008007.
- [19] ROYALL R M. On finite population sampling theory under certain linear regression models[J]. *Biometrika*, 1970, 57(2): 377–387. DOI: 10.1093/biomet/57.2.377.
- [20] RENNOLLS K. The use of superpopulation-prediction methods in survey analysis, with application to the British National Census of Woodlands and Trees[C]// LUND H D. *In place resource inventories: principles and practices*. Maryland: Society of American Foresters, 1981: 395–401.
- [21] GREGOIRE T G. Design-based and model-based inference in survey sampling: appreciating the difference[J]. *Can J For Res*, 1998, 28(10): 1429–1447. DOI: 10.1139/x98-166.
- [22] 王甜, 王雪峰, 刘嘉政. 基于 RFE_RF 算法的幼龄沉香叶片含水率预估模型[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(4): 177–184. WANG T, WANG X F, LIU J Z. The prediction model of moisture content of young *Aquilaria sinensis* leaves based on RFE_RF algorithm[J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, 46(4): 177–184. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202010043.
- [23] MANDALLAZ D. Sampling techniques for forest inventories[M]. Boca Raton FL: Chapman & Hall/CRC, 2008.
- [24] GRAUBARDAND B I, KORN E L. Inference for superpopulation parameters using sample surveys[J]. *Statist Sci*, 2002, 17(1): 73–96. DOI: 10.1214/ss/1023798999.
- [25] MCROBERTS R E, WESTFALL J A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates[J]. *For Sci*, 2014, 60(1): 34–42. DOI: 10.5849/forsci.12-141.
- [26] SÄRNDALE C E, SWENSSON B, WRETMAN J. Model assisted survey sampling[M]. New York: Springer, 1992.
- [27] STÅHL G, HOLM S, GREGOIRE T G, et al. Model-based inference for biomass estimation in a LiDAR sample survey in Hedmark County, Norway[J]. *Can J For Res*, 2011, 41(1): 96–107. DOI: 10.1139/x10-161.
- [28] CORONA P, FATTORINI L, FRANCESCHI S, et al. Estimation of standing wood volume in forest compartments by exploiting airborne laser scanning information: model-based, design-based, and hybrid perspectives[J]. *Can J For Res*, 2014, 44(11): 1303–1311. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0203.
- [29] CAJANUS W. A method for ocular estimation of the growing stock of forests[J]. *Tapio*, 1913, 6: 77–79.
- [30] NEYMAN J. On the two different aspects of the representative method: the method of stratified sampling and the method of purposive selection[J]. *J Royal Stat Soc*, 1934, 97(4): 558–606. DOI: 10.1111/j.2397-2335.1934.tb04184.x.
- [31] LISTER A J, ANDERSEN H, FRESCINO T, et al. Use of remote sensing data to improve the efficiency of national forest inventories: a case study from the United States national forest inventory[J]. *Forests*, 2020, 11(12): 1364. DOI: 10.3390/f11121364.
- [32] MCROBERTS R E, TOMPPA E O. Remote sensing support for national forest inventories[J]. *Remote Sens Environ*, 2007, 110(4): 412–419. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.034.
- [33] COCHRAN W G. Sampling techniques[M]. 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- [34] MCROBERTS R E, GOBAKKEN T, NASSET E. Post-stratified estimation of forest area and growing stock volume using lidar-based stratifications[J]. *Remote Sens Environ*, 2012, 125: 157–166. DOI: 10.1016/j.rse.2012.07.002.
- [35] ALLEN B C. The sampling design used in the forest survey of the northeast[J]. *J For*, 1952, 50(4): 290–293.
- [36] LAWRENCE P R, WALKER B B. Methods and results of forest assessment using random sampling units in photo-interpreted strata[J]. *Aust For*, 1954, 18(2): 107–127. DOI: 10.1080/00049158.1954.10675319.
- [37] POSO S, HÄME T, PAANANEN R. A method for estimating the stand characteristics of a forest compartment using satellite imagery[J]. *Silva Fenn*, 1984, 18(3): 261–296. DOI: 10.14214/sf.a15398.
- [38] TOMPPA E, GSCHWANTNER T, LAWRENCE M, et al. National Forest Inventories: pathways for common reporting[M]. New York: Springer, 2010.
- [39] HANSEN M H, WENDT D G. Using classified Landsat Thematic Mapper data for stratification in a statewide forest inventory[C]// MCROBERTS R E, REAMS G A, VAN DEUSEN P C. *Proceedings of the First Annual Forest Inventory and Analysis Symposium*. San Antonio: Department of Agriculture, Forest

- Service, North Central Research Station Available, 2012; 20-27.
- [40] KAMWI J M, KÄTSCH C. Using high-resolution satellite imagery and double sampling as a cost-effective means of collecting forest inventory data: the case of Hans Kanyinga Community Forest, Namibia[J]. South For a J For Sci, 2009, 71(1): 49-58. DOI: 10.2989/sf.2009.71.1.7.744.
- [41] DEO SINGH K. Remote sensing applications in forest inventory [C]//Capacity building for the planning, assessment and systematic observations of forests. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 115-130.
- [42] KANGAS A, ASTRUP R, BREIDENBACH J, et al. Remote sensing and forest inventories in Nordic countries-roadmap for the future[J]. Scand J For Res, 2018, 33(4): 397-412. DOI: 10.1080/02827581.2017.1416666.
- [43] 蒲莹, 张煜星, 曾伟生, 等. 森林资源清查向森林生态系统监测转型技术[J]. 科技创新与品牌, 2021(5): 76-79. PU Y, ZHANG Y X, ZENG W S, et al. Transformation technology from forest resources inventory to forest ecosystem monitoring[J]. Sci Tech Innov Brands, 2021(5): 76-79. DOI: 10.3969/j.issn.1673-940X.2021.05.025.
- [44] 罗仙仙, 亢新刚, 杨华. 我国森林资源综合监测抽样理论研究综述[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 187-193. LUO X X, KANG X G, YANG H A. A review on the sampling theory of forest resources comprehensive monitoring[J]. J Northwest For Univ, 2008, 23(6): 187-193.
- [45] 史京京, 雷渊才, 赵天忠. 森林资源抽样调查技术方法研究进展[J]. 林业科学研究, 2009, 22(1): 101-108. SHI J J, LEI Y C, ZHAO T Z. Progress in sampling technology and methodology in forest inventory[J]. For Res, 2009, 22(1): 101-108. DOI: 10.3321/j.issn.1001-1498.2009.01.018.
- [46] 张会儒, 雷相东, 李凤日. 中国森林经理学研究进展与展望[J]. 林业科学, 2020, 56(9): 130-142. ZHANG H R, LEI X D, LI F R. Research progress and prospects of forest management science in China[J]. Sci Silvae Sin, 2020, 56(9): 130-142. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20200915.
- [47] 李芝喜, 曹宁湘, 王维勤, 等. 利用遥感技术多阶不等概抽样清查森林资源[J]. 北京林学院学报, 1985, 7(2): 70-75. LI Z X, CAO N X, WANG W Q, et al. Using remote sensing technology to check forest resources by multi-order unequal sampling[J]. J Beijing For Univ, 1985, 7(2): 70-75.
- [48] 欧润贵. 对航天遥感资料应用于以县为总体的森林资源连续清查的建议[J]. 林业资源管理, 1991(1): 48-50. OU R G. Suggestions on the application of space remote sensing data to continuous inventory of forest resources in counties as a whole[J]. For Resour Manag, 1991(1): 48-50. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.1991.01.018.
- [49] 曾伟生. 遥感技术在森林资源清查中的应用问题探讨[J]. 中南林业调查规划, 2004, 23(1): 47-49. ZENG W S. Discussion on application of remote sensing in forest inventories[J]. Central South For Invent Plan, 2004, 23(1): 47-49. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6075.2004.01.014.
- [50] 林辉, 熊育久, 孙华, 等. 湖南省森林资源连续清查遥感应用研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(4): 33-38. LIN H, XIONG Y J, SUN H, et al. Application of remote sensing to continuous forest inventory research in Hunan Province[J]. J Central South Univ For & Technol, 2007, 27(4): 33-38. DOI: 10.3969/j.issn.1673-923X.2007.04.006.
- [51] 郑冬梅, 智长贵, 黄国胜, 等. 遥感大样地点面判读方法在森林资源宏观监测中的应用分析[J]. 林业资源管理, 2017(6): 137-142, 148. ZHENG D M, ZHI C G, HUANG G S, et al. Analysis of forest resources monitoring by zoning interpretation and point interpretation of remote sensing large plot[J]. For Resour Manag, 2017(6): 137-142, 148. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2017.06.024.
- [52] 程志楚, 夏朝宗, 王海滨, 等. 大样地调查方案在森林资源调查中的可行性分析[J]. 河北农业大学学报, 2015, 38(3): 64-68. CHENG Z C, XIA C Z, WANG H B, et al. Feasibility analysis on a new scheme based on large plot in forest resources survey[J]. J Agric Univ Hebei, 2015, 38(3): 64-68. DOI: 10.13320/j.cnki.jauh.2015.0061.
- [53] 王雪军, 张煜星, 黄国胜, 等. 全国森林面积和森林蓄积年度出数方法探讨[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(1): 9-18. WANG X J, ZHANG Y X, HUANG G S, et al. Discussion on methods for annual national producing estimates of forest area and forest stock in China[J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 2016, 38(1): 9-18. DOI: 10.13836/j.jjau.2016002.
- [54] SÄRDAL C E. The calibration approach in survey theory and practice[J]. Surv Methodol, 2007, 33(2): 99-119.
- [55] BREIDT F J, CLAESKENS G, OPSOMER J D. Model-assisted estimation for complex surveys using penalised splines[J]. Biometrika, 2005, 92(4): 831-846. DOI: 10.1093/biomet/92.4.831.
- [56] OPSOMER J D, BREIDT F J, MOISEN G G, et al. Model-assisted estimation of forest resources with generalized additive models[J]. J Am Stat Assoc, 2007, 102(478): 400-409. DOI: 10.1198/016214506000001491.
- [57] BOUDREAU J, NELSON R F, MARGOLIS H A, et al. Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec[J]. Remote Sens Environ, 2008, 112(10): 3876-3890. DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.003.
- [58] ANDERSEN H E, BARRETT T, WINTERBERGER K, et al. Estimating forest biomass on the western lowlands of the Kenai Peninsula of Alaska using airborne LiDAR and field plot data in a model-assisted sampling design[C]// Proceedings of the IUFRO Division 4 Conference: "Extending Forest Inventory and Monitoring over Space and Time", 2009: 19-22.
- [59] NÆSSET E, GOBAKKEN T, SOLBERG S, et al. Model-assisted regional forest biomass estimation using LiDAR and InSAR as auxiliary data: a case study from a boreal forest area[J]. Remote Sens Environ, 2011, 115(12): 3599-3614. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.021.
- [60] GREGOIRE T G, STÅHL G, NÆSSET E, et al. Model-assisted estimation of biomass in a LiDAR sample survey in Hedmark County, Norway[J]. Can J For Res, 2011, 41(1): 83-95. DOI: 10.1139/x10-195.
- [61] ENE L T, NÆSSET E, GOBAKKEN T, et al. A simulation approach for accuracy assessment of two-phase post-stratified estimation in large-area LiDAR biomass surveys[J]. Remote Sens Environ, 2013, 133: 210-224. DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.002.
- [62] GREGOIRE T G, NÆSSET E, MCROBERTS R E, et al. Statistical rigor in LiDAR-assisted estimation of aboveground forest biomass[J]. Remote Sens Environ, 2016, 173: 98-108. DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.012.
- [63] STEPHENS P R, KIMBERLEY M O, BEETS P N, et al. Airborne scanning LiDAR in a double sampling forest carbon inventory[J]. Remote Sens Environ, 2012, 117: 348-357. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.009.
- [64] STRUNK J L, REUTEBUCH S E, ANDERSEN H E, et al. Model-assisted forest yield estimation with light detection and ranging[J]. West J Appl For, 2012, 27(2): 53-59. DOI: 10.5849/wjaf.10-043.
- [65] NELSON R, GOBAKKEN T, NÆSSET E, et al. Lidar sampling: using an airborne profiler to estimate forest biomass in Hedmark County, Norway[J]. Remote Sens Environ, 2012, 123: 563-578. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.036.
- [66] GOBAKKEN T, NÆSSET E, NELSON R, et al. Estimating biomass in Hedmark County, Norway using national forest

- inventory field plots and airborne laser scanning[J]. *Remote Sens Environ*, 2012, 123: 443–456. DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.025.
- [67] NÆSSET E, GOBAKKEN T, BOLLANDSÅS O M, et al. Comparison of precision of biomass estimates in regional field sample surveys and airborne LiDAR-assisted surveys in Hedmark County, Norway[J]. *Remote Sens Environ*, 2013, 130: 108–120. DOI: 10.1016/j.rse.2012.11.010.
- [68] MASSEY A, MANDALLAZ D, LANZ A. Integrating remote sensing and past inventory data under the new annual design of the Swiss National Forest Inventory using three-phase design-based regression estimation[J]. *Can J For Res*, 2014, 44(10): 1177–1186. DOI: 10.1139/CJFR-2014-0152.
- [69] CHIRICI G, MCROBERTS R E, FATTORINI L, et al. Comparing echo-based and canopy height model-based metrics for enhancing estimation of forest aboveground biomass in a model-assisted framework[J]. *Remote Sens Environ*, 2016, 174: 1–9. DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.010.
- [70] 唐守正. 关于两相抽样面积蓄积统计的原则[J]. *林业资源管理*, 1996(4): 18–22. TANG S Z. On the principle of accumulation statistics of two-phase sampling area[J]. *For Resour Manag*, 1996(4): 18–22.
- [71] 宋新民, 李金良. 抽样调查技术[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2007. SONG X M, LI J L. Sampling survey techniques[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007.
- [72] 葛宏立, 周国模, 张国江, 等. 遥感、地面三相抽样及其在森林资源年度监测面积估计中的应用[J]. *林业科学*, 2007, 43(6): 77–82. GE H L, ZHOU G M, ZHANG G J, et al. RS-land three-phase sampling technique and its application to area estimation in annual forest inventory[J]. *Sci Silvae Sin*, 2007, 43(6): 77–82. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2007.06.014.
- [73] 张宗秀, 高天雷, 张文. 双重二阶抽样提高森林资源抽样精度的研究[J]. *四川林业科技*, 2013, 34(5): 8–12. ZHANG Z X, GAO T L, ZHANG W. Study on improving the sampling accuracy of forest resources by double sampling[J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2013, 34(5): 8–12. DOI: 10.16779/j.cnki.1003-5508.2013.05.002.
- [74] BACCINI A, LAPORTE N, GOETZ S J, et al. A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery[J]. *Environ Res Lett*, 2008, 3(4): 045011. DOI: 10.1088/1748-9326/3/4/045011.
- [75] ARMSTON J D, DENHAM R J, DANAHER T J, et al. Prediction and validation of foliage projective cover from Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ imagery[J]. *J App Ren Sen*, 2009, 3: 33540. DOI: 10.1117/1.3216031.
- [76] ASNER G P, POWELL G V N, MASCARO J, et al. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107(38): 16738–16742. DOI: 10.1073/pnas.1004875107.
- [77] HELMER E H, RUZYCKI T S, WUNDERLE J M J, et al. Mapping tropical dry forest height, foliage height profiles and disturbance type and age with a time series of cloud-cleared Landsat and ALI image mosaics to characterize avian habitat[J]. *Remote Sens Environ*, 2010, 114(11): 2457–2473. DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.021.
- [78] STRUNK J, TEMESGEN H, ANDERSEN H E, et al. Effects of lidar pulse density and sample size on a model-assisted approach to estimate forest inventory variables[J]. *Can J Remote Sens*, 2012, 38(5): 644–654. DOI: 10.5589/m12-052.
- [79] ZHANG R, ZHOU X H, OUYANG Z T, et al. Estimating aboveground biomass in subtropical forests of China by integrating multisource remote sensing and ground data[J]. *Remote Sens Environ*, 2019, 232: 111341. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111341.
- [80] CHIRICI G, GIANNETTI F, MCROBERTS R E, et al. Wall-to-wall spatial prediction of growing stock volume based on Italian National Forest Inventory plots and remotely sensed data[J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 2020, 84: 101959. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101959.
- [81] MAGNUSSEN S, NÆSSET E, GOBAKKEN T. LiDAR-supported estimation of change in forest biomass with time-invariant regression models[J]. *Can J For Res*, 2015, 45(11): 1514–1523. DOI: 10.1139/cjfr-2015-0084.
- [82] GULDIN R W. A systematic review of small domain estimation research in forestry during the twenty-first century from outside the United States[J]. *Front For Glob Change*, 2021, 4: 695929. DOI: 10.3389/ffgc.2021.695929.
- [83] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification[J]. *IEEE Trans Autom Control*, 1974, 19(6): 716–723. DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705.
- [84] SITTE R R. Variance estimation for the regression estimator in two-phase sampling[J]. *J Am Stat Assoc*, 1997, 92(438): 780–787. DOI: 10.1080/01621459.1997.10474031.
- [85] SAARELA S, HOLM S, HEALEY S, et al. Generalized hierarchical model-based estimation for aboveground biomass assessment using GEDI and landsat data[J]. *Remote Sens*, 2018, 10(11): 1832. DOI: 10.3390/rs10111832.
- [86] HANSEN M H, MADOW W G, TEPPING B J. An evaluation of model-dependent and probability-sampling inferences in sample surveys[J]. *J Am Stat Assoc*, 1983, 78(384): 776–793. DOI: 10.1080/01621459.1983.10477018.
- [87] VALLIANT R. Nonlinear prediction theory and the estimation of proportions in a finite population[J]. *J Am Stat Assoc*, 1985, 80(391): 631–641. DOI: 10.1080/01621459.1985.10478163.
- [88] VALLIANT R, DORFMAN A H, ROYALL R M. Finite population sampling and inference: a prediction approach[M]. Chichester: Wiley, 2000.
- [89] MCROBERTS R E. A model-based approach to estimating forest area[J]. *Remote Sens Environ*, 2006, 103(1): 56–66. DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.005.
- [90] CHEN Q, VAGLIO L G, VALENTINI R. Uncertainty of remotely sensed aboveground biomass over an African tropical forest: propagating errors from trees to plots to pixels[J]. *Remote Sens Environ*, 2015, 160: 134–143. DOI: 10.1016/j.rse.2015.01.009.
- [91] CHEN Q, MCROBERTS R E, WANG C W, et al. Forest aboveground biomass mapping and estimation across multiple spatial scales using model-based inference[J]. *Remote Sens Environ*, 2016, 184: 350–360. DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.023.
- [92] LEFSKY M A, COHEN W B, SPIES T A. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon[J]. *Can J For Res*, 2001, 31(1): 78–87. DOI: 10.1139/cjfr-31-1-78.
- [93] HYDE P, NELSON R, KIMES D, et al. Exploring LiDAR-RaDAR synergy: predicting aboveground biomass in a southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR and InSAR[J]. *Remote Sens Environ*, 2007, 106(1): 28–38. DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.017.
- [94] GONZALEZ P, ASNER G P, BATTLES J J, et al. Forest carbon densities and uncertainties from LiDAR, QuickBird, and field measurements in California[J]. *Remote Sens Environ*, 2010, 114(7): 1561–1575. DOI: 10.1016/j.rse.2010.02.011.
- [95] SIMARD M, PINTO N, FISHER J B, et al. Mapping forest canopy height globally with spaceborne Lidar[J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2011, 116(G4): G04021. DOI: 10.1029/2011JG001708.
- [96] POPESCU S C, ZHOU T, NELSON R, et al. Photon counting LiDAR: an adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data[J]. *Remote Sens Environ*, 2018, 208: 154–170. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.019.

- [97] DUBAYAH R, BLAIR J B, GOETZ S, et al. The global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography [J]. *Sci Remote Sens*, 2020, 1: 100002. DOI: 10.1016/j.srs.2020.100002.
- [98] POTAPOV P, LI X Y, HERNANDEZ-SERNA A, et al. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data [J]. *Remote Sens Environ*, 2021, 253: 112165. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.
- [99] SAARELA S, HOLM S, GRAFSTRÖM A, et al. Hierarchical model-based inference for forest inventory utilizing three sources of information [J]. *Ann For Sci*, 2016, 73(4): 895–910. DOI: 10.1007/s13595-016-0590-1.
- [100] PULITI S, ENE L T, GOBAKKEN T, et al. Use of partial-coverage UAV data in sampling for large scale forest inventories [J]. *Remote Sens Environ*, 2017, 194: 115–126. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.019.
- [101] PULITI S, SAARELA S, GOBAKKEN T, et al. Combining UAV and Sentinel-2 auxiliary data for forest growing stock volume estimation through hierarchical model-based inference [J]. *Remote Sens Environ*, 2018, 204: 485–497. DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.007.
- [102] SAARELA S, WÄSTLUND A, HOLMSTRÖM E, et al. Mapping aboveground biomass and its prediction uncertainty using LiDAR and field data, accounting for tree-level allometric and LiDAR model errors [J]. *For Ecosyst*, 2020, 7: 43. DOI: 10.1186/s40663-020-00245-0.
- [103] ESTEBAN J, MCROBERTS R, FERNÁNDEZ-LANDA A, et al. Estimating forest volume and biomass and their changes using random forests and remotely sensed data [J]. *Remote Sens*, 2019, 11(16): 1944. DOI: 10.3390/rs11161944.
- [104] SANDOVAL S, BUSTAMANTE-ORTEGA R. Estimation of uncertainty in airborne LiDAR inventories using approaches based on bootstrapping-pairs methods [J]. *Forests*, 2020, 11(12): 1305. DOI: 10.3390/f11121305.
- [105] 李增元, 赵磊, 李堃, 等. 合成孔径雷达森林资源监测技术研究综述 [J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2020, 12(2): 150–158. LI Z Y, ZHAO L, LI K, et al. A survey of developments on forest resources monitoring technology of synthetic aperture radar [J]. *J Nanjing Univ Inf Sci & Technol (Nat Sci Ed)*, 2020, 12(2): 150–158. DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2020.02.002.
- [106] 庞勇, 李增元, 陈博伟, 等. 星载激光雷达森林探测进展及趋势 [J]. *上海航天*, 2019, 36(3): 20–28. PANG Y, LI Z Y, CHEN B W, et al. Status and development of spaceborne lidar applications in forestry [J]. *Aerosp Shanghai*, 2019, 36(3): 20–28. DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.03.003.
- [107] 黄华国. 林业定量遥感研究进展和展望 [J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(12): 1–14. HUANG H G. Progress and perspective of quantitative remote sensing of forestry [J]. *J Beijing For Univ*, 2019, 41(12): 1–14. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20190326.
- [108] 张王菲, 陈尔学, 李增元, 等. 干涉、极化干涉 SAR 技术森林高度估测算法研究进展 [J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(6): 983–997. ZHANG W F, CHEN E X, LI Z Y, et al. Development of forest height estimation using InSAR/PolInSAR technology [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 2017, 32(6): 983–997. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.6.0983.
- [109] 张煜星, 王雪军, 黄国胜, 等. 森林面积多阶遥感监测方法 [J]. *林业科学*, 2017, 53(7): 94–104. ZHANG Y X, WANG X J, HUANG G S, et al. Forest area remote sensing monitoring using the multi-level sampling interpretation approach [J]. *Sci Silvae Sin*, 2017, 53(7): 94–104. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20170710.
- [110] ZHAO J P, ZHAO L, CHEN E, et al. An improved generalized hierarchical estimation framework with geo statistics for mapping forest parameters and its uncertainty: a case study of forest canopy height [J]. *Remote Sens*, 2022, 14(3): 568. DOI: 10.3390/rs14030568.
- [111] ANDERSEN H E, STRUNK J, TEMESGEN H. Using airborne light detection and ranging as a sampling tool for estimating forest biomass resources in the upper Tanana valley of interior Alaska [J]. *West J Appl for*, 2011, 26(4): 157–164. DOI: 10.1093/wjaf/26.4.157.
- [112] HENRIK J P, KENNETH O, JOHAN H. Two-phase forest inventory using very-high-resolution laser scanning [J]. *Remote Sens Environ*, 2022, 271: 112909. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112909.
- [113] MAGNUSSEN S, NÆSSET E, GOBAKKEN T. An estimator of variance for two-stage ratio regression estimators [J]. *For Sci*, 2014, 60(4): 663–676. DOI: 10.5849/forsci.12-163.
- [114] HEALEY S P, PATTERSON P L, SAATCHI S, et al. A sample design for globally consistent biomass estimation using lidar data from the geoscience laser altimeter system (GLAS) [J]. *Carbon Balance Manag*, 2012, 7(1): 10. DOI: 10.1186/1750-0680-7-10.
- [115] MARGOLIS H A, NELSON R F, MONTESANO P M, et al. Combining satellite lidar, airborne lidar, and ground plots to estimate the amount and distribution of aboveground biomass in the boreal forest of north America [J]. *Can J For Res*, 2015, 45(7): 838–855. DOI: 10.1139/cjfr-2015-0006.
- [116] CONDÉS S, MCROBERTS R E. Updating national forest inventory estimates of growing stock volume using hybrid inference [J]. *For Ecol Manag*, 2017, 400: 48–57. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.04.046.
- [117] 鲁赛尼·阿特马维扎扎, 劳可邁. 用航空照片双重抽样进行森林资源清查 [J]. *中南林业调查规划*, 1982, 1(1): 53–55, 43. LUSAINI A, LAO K Q. Inventory of forest resources by double sampling of aerial photographs [J]. *Central South For Inventory Plan*, 1982, 1(1): 53–55, 43.
- [118] 陈振雄, 熊智平, 曾伟生, 等. 基于大样地双重抽样方法的广东省森林资源监测研究 [J]. *中南林业调查规划*, 2014, 33(3): 28–33. CHEN Z X, XIONG Z P, ZENG W S, et al. Forest resources monitoring based on double sampling with large plot in Guangdong [J]. *Central South For Invent Plan*, 2014, 33(3): 28–33. DOI: 10.16166/j.cnki.cn43-1095.2014.03.024.
- [119] 曾伟生, 夏锐. 全国森林资源调查年度出数统计方法探讨 [J]. *林业资源管理*, 2021(2): 29–35. ZENG W S, XIA R. Discussion on methodology for generating annual estimates in national forest inventory [J]. *For Resour Manag*, 2021(2): 29–35. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2021.02.005.
- [120] 曹林, 周凯, 申鑫, 等. 智慧林业发展现状与展望 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(6): 83–95. CAO L, ZHOU K, SHEN X, et al. The status and prospects of smart forestry [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, 46(6): 83–95. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202209052.
- [121] 曾伟生. 森林资源调查监测中的数据耦合方法研究 [J]. *林业资源管理*, 2022(2): 61–66. ZENG W S. A study on method of data coupling in forest inventory and monitoring [J]. *For Resour Manag*, 2022(2): 61–66. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2022.02.009.

(责任编辑 郑琰琰 孟苗婧)